美国国家科学基金会对融合研究的资助及启示

樊春良* 李东阳 樊 天

1 中国科学院科技战略咨询研究院 北京 100190
2 中国科学院大学 公共政策与管理学院 北京 100049

摘要 融合研究是促进科学技术发展的新范式，不仅会促进科学技术取得突破性发展，而且是解决21世纪人类面临宏大挑战的一种重要途径。文章考察了融合研究的内涵和特点，以及美国国家科学基金会（NSF）融合研究的概念；根据NSF十大投入计划和新的战略规划（2018—2022年），指出发展融合研究在NSF中的战略地位；分析NSF支持融合研究的基础和融合项目的特点，并对第一批融合项目的实施作了介绍；总结出NSF支持融合研究可供借鉴的若干结论，并对我国发展融合研究提出若干建议。

关键词 融合研究，科学范式，美国国家科学基金会，政策建议

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045. 20191231001

融合研究（convergence research）是促进科学技术发展的一种新范式，最早出现在纳米科技领域。这种新范式近年来扩展到物质科学、工程学和生命科学领域，已经产生了许多重要的突破；并且正被应用到包括能源、粮食、气候和水资源在内的广泛领域中，被认为是解决21世纪人类面临气候变化、能源短缺、人口膨胀、环境污染等巨大挑战的一条重要途径。

欧美发达国家十分重视融合研究，不仅建立了一批融合研究机构，而且在国家相关科技计划的实施中把融合研究放在重要位置。例如，欧盟“地平线2020”计划，美国能源部（DOE）高级能源研究计划署（ARPA-E）、美国国立卫生研究院（NIH）和美国国家科学基金会（NSF）等都设有专门支持融合研究的计划。其中，NSF对融合研究的资助有明确的指导思想和系统的实施计划，对我国发展融合研究有重要的参考价值。本文在分析融合研究思想内涵及特点的基础上，对NSF支持融合研究的战略地位和具体实施

*通讯作者
资助项目：国家自然科学基金委员会计划局项目（J1824007）
修改稿收到日期：2020年1月8日

措施作了详细研究，提出可供我国发展融合研究借鉴的若干结论和建议。

1 融合研究的一般概念

科学的发展遵循着交叉融合进程不断深入的规律。从单个学科发展，到多学科汇集解决科学问题，到学科间交叉研究，产生新的问题、学科、方法、领域，再发展到融合（convergence）。融合研究是更深程度的学科交叉研究。融合与一般学科交叉研究区别在于涉及学科更多，交叉融合程度更高。

关于融合，早在2002年，就有学者从纳米领域研究融合技术（converging technologies）[1]。近年来，美国麻省理工学院（MIT）、美国国家科学院（NAS）等机构相继发表了一系列关于融合研究的报告，推动了关于融合的研究[2,3]。

NAS和MIT关于融合研究的阐释，揭示了融合研究一般的内涵和特点。

按照NAS的解释："融合是一种通过跨越不同学科边界来解决问题的方法。它整合了生命科学与健康科学、物质科学（如物理学、化学、材料学等）、数学以及计算机科学、工程学等众多专业领域的相关知识、工具和思维方式，构建一个全面综合的框架，用以应对多领域交叉的科学与社会挑战"；"融合研究是学科交叉研究的一种扩展形式。……融合的核心是高水平地整合众多知识领域的思想、方法和技术，这对于解决复杂问题及解答新兴学科中复杂知识问题都是一个关键的策略"[4]。

MIT报告认为，融合研究是一个新范式，可以在广泛的领域产生关键的进展[2]。融合范式不是指库恩范式理论①中学科范式的转变，而是指由多学科融合会聚而产生的整体性的新范式。融合范式提供了超越通常范式的思考能力，可以从许多视角而不是少数几个视角处理议题。NAS报告指出，融合"能够为新思想、新发现、新思维以及新方法、新工具的产生提供一种新的范式，从而促进基础研究的发展，带来新发明、创新、治疗流程，发展教育与培训的新模式、新策略"[4]。

融合范式包括2个既密切联系又截然不同的特征：相关专业知识的融合；形成合作伙伴关系。成功的融合研究具有4个必不可少的文化与组织架构因素：人员、组织、文化和生态系统。把融合研究融入组织机构面临着挑战，需要管理和机制上的创新。

2 NSF的融合研究概念

NSF对融合研究的理解和阐释，基于融合研究一般概念产生和发展的大背景之下，但同时又有自己的独特性，即突出资助项目的特点，强调凝练科学问题和解决科学问题的融合性。

NSF[5]认为，融合研究是一种解决困难问题的研究方法，特别是解决社会需求的复杂问题。它需要整合来自不同学科的知识、方法和专业技能，形成新的框架来促进科学发现和创新。融合研究与之前学科交叉研究的其他研究形式——跨学科（transdisciplinarity）、学科交叉（interdisciplinarity）和多学科（multidisciplinarity）相关。NSF认为，融合研究有2个主要特征：① 由一个特定的和紧迫的问题驱动。融合研究的激励通常来自解决一个特定挑战或机遇的需要，或来自深层次的科学问题，或迫切的社会需求。② 跨学科的深度整合。在不同学科的专家解决所面临共同的研究挑战的过程中，他们的知识、理论、方法、数据、研究共同体和语言逐渐融合，持续交互，形成新的研究范式，从而发展研究问题的新方

① 美国科学哲学家托马斯·库恩在1962年出版的《科学革命的结构》一书中，提出了科学革命理论，认为科学的发展基于科学共同体共同拥有范式（paradigm）——一组关于自然认识的观念、理论、准则和方法的总和。库恩认为，科学的发展并不是一个单纯积累的过程，而是经历根本性的变化——科学革命，即新旧范式的转变。例如，物理学从牛顿经典力学发展到现代量子力学就是一个新旧范式的转变。

法，开辟新的研究远景。

可见，NSF 的融合研究概念强调与之前学科交叉研究的延续性，并且注重融合研究自身的实施逻辑和过程。

3 融合研究在 NSF 科学资助中的战略地位

3.1 发展融合研究是NSF的十大投入计划之一

2016年，NSF 提出未来投入的十大计划（big idea），这代表了 NSF 未来长期的研究议程。这十大投入计划是：① 未来人机融合的技术前沿；② 利用数据革命；③ 探索新北极；④ 量子跃迁；⑤ 理解生命的规则；⑥ 宇宙的窗口；⑦ 发展融合研究；⑧ 中等规模的研究基础设施；⑨ NSF“2026”；⑩ NSF多样性参与。在这 10 个计划中，前 6 个是科学研究前沿计划，后 4 个是机制和支撑创新计划。对这 10 个计划的投入是利用新建立的资助机制和已有机制，在每年的预算中单列的，为整个基金会层面的投入。NSF 提出这十大投入计划的原因是，希望提出一些针对未来几十年发展影响重大的宏大科学问题，以推动 NSF 长远的研究议程，确保未来几代人继续从基础科学与环境研究中获益。NSF 力图通过资助这十大投入计划的前沿科学问题以及相应机制上的创新，以推动美国在科学研究前沿的进展。这不仅会带来未知的发现，而且为解决世界面临的一些最紧迫问题提供创新方法[6]。

“发展融合研究”（GCR）是十大投入计划之一。NSF[7]对其意义做了如下解释：“当今的重大挑战，如保护人类健康，理解食物、能源、水的关系，以及探索宇宙的各个层面，这不是一个学科就能解决的。它们需要融合：将来自广泛不同知识领域的思想、方法和技术融合起来，以刺激创新和发现。”GCR 是机制上的投入计划，通过对促进前沿科学问题融合研究的支持，推进科学前沿进展。

3.2 融合研究在NSF《战略规划》中的地位

2018 年 2 月，NSF 发布了《构建未来：投资发现和创新——NSF 战略规划（2018—2022 财年）》（以下简称《战略规划》）[8]。美国 1993 年《政府绩效法案》和 2010 年《政府绩效现代化法案》要求联邦政府相关机构制定战略规划，提出长期的战略目标、任务以及具体的近期绩效目标。NSF《战略规划》就是在这一法律的要求下制定的，是 NSF 的 5 年行动指导。

融合研究在 NSF《战略规划》中占有重要位置：① NSF 把融合研究看作其制定新一轮战略规划要考虑的重要当代因素之一②，明确要求瞄准具有潜在高回报的极具挑战性的研究问题；② 在《战略规划》的战略目标中，明确支持和发展融合研究。为实现 NSF 第一个战略目标（拓展科学、工程和学习领域的知识），《战略规划》强调“支持像融合研究这样的新兴范式”；指出“融合研究，与不同学科之间的开放数据共享一起，可以带来前所未有的突破，形成全新的学科。融合范式的实施包括一开始就提出具有挑战性的研究问题，并促进成功开展研究所需的长期合作”。为实现 NSF 第二个战略目标（改善国家应对当前和未来挑战的能力），《战略规划》指出，“NSF 帮助研究共同体聚焦于具有高度优先性的国家挑战的最根本方面，使合作团队应用融合研究的方法，促进影响驱动、用户激励的研究（impact-driven, use-inspired research）”，并提出“简化机构流程，破除形成公私伙伴关系的障碍和阻碍，推进融合研究”[8]。

4 NSF对融合项目的支持

4.1 NSF对融合项目支持的基础

NSF 主任 France Córdovat 谈到 NSF 对融合研究的资助时说：“NSF 支持跨学科合作已经有几十年了。融合是一种更深入、更有意识的方法，将知识、技术

② 其他当代因素有：全球性竞争、新的使能技术、数据密集型科学、复杂系统的作用。

和专业知识从多个学科整合到一起，以解决最紧迫的科学和社会挑战。”[9]NSF 数十年来对学科交叉研究的资助，积累了丰富的经验，并与科学技术领域的大学和研究机构都有深厚的联系，对于进一步支持融合研究奠定了很好的基础。

实际上，在长期对学科交叉研究的资助中，NSF 所资助的一些学科交叉研究就是融合研究。例如，信息物理系统（CPS）融合了生命科学、物质科学、计算机科学和工程学等领域；科学技术中心是促进和发展融合研究的一条极好的实践模式；合成生物学则是生命科学、物质科学和工程学领域的融合典范[10]。

4.2 融合项目资助的目标和机制

GCR 是 NSF 资助融合式研究的主要投入机制。其主要目标是在现有的学科交叉领域，促进解决紧迫的科学和工程学研究问题的融合方法。GCR 主要采取 3 种机制以实现其目标：① 能力建设活动。包括讨论班、创意实验室（ideas labs）和研究协调网络（RCNs），同时也鼓励研究人员提出其他能力建设的新方法。能力建设的目的一方面在于促进美国大学研究人员与工业界、联邦实验室、非营利研究组织和国际研究界等建立新伙伴关系；另一个方面在于扩大参与融合研究小组的人口多样性。② 探索性补助金。支持建设融合研究小团队。③ 提高价值评议过程[11]。

RCNs 是指，通过支持不同的研究小组跨越学科、组织、地理和国际边界，在研究、培训和教育活动中进行交流，以推进一个领域的进展，或在研究、教育方面创造新的方向。RCNs 项目提供促进新合作的机会，包括搭建国际合作伙伴关系、解决跨学科课题等。RCNs 项目特别鼓励研究人员提出关于建立新网络的创新性想法，包括形成协同网络的策略、合作的技术、培训、扩大参与度等方面[12]。

4.3 NSF对融合项目的申报要求

融合范式建立在学科交叉研究方法之上。成功的融合项目比一般学科交叉项目需要更多的条件。因此，NSF 具体刻画了融合项目的特点，并对申请融合项目的条件作出严格明确的要求。

NSF[13]对于申报融合项目有 4 个要求：*① 使用融合方法的必要性。*应该给出一个令人信服的理由，以说明为什么该项目必须把本质上不同的科学和工程学学科放在一起，以解决一个特定的科学挑战或社会问题。*② 从事融合研究的准备。*为了取得重大进展，研究组需要提供证明材料，如以前的学科交叉项目、首席研究员（PI）和联合 PI 共同发表的文章等，已证明他们已做好开展融合研究的准备工作；同时，表明项目组由不同学科的成员构成。*③ 知识、工具和思维模式的集成。*要为相关学科知识基础的深度集成提供令人信服的案例；应展示综合研究方法的新颖性，且该方法是由相关学科所特有的思维模式的组合而产生的。*④ 下一代融合研究人员的参与。*鼓励融合项目为本科生、研究生及博士后提供新的学习和经验，从而为融合研究培养下一代储备人才。融合项目要明确给出这些人的角色和定位，如：在学习使用新工具、仪器和技术中将扮演什么样的角色？在本专业领域之外需要学习哪些概念，如何学习？该项目是否会提供新的模式学习环境，以适应其他融合研究项目？

NSF[14]在 2018 年《致同事的一封信：增加融合研究》中，鼓励科学家申报有革命性进展潜力的新融合领域的项目，要求研究领域和拟议的项目必须反映上述融合研究项目的特点。

4.4 NSF第一批融合项目

NSF 于 2017 年发布第一批 23 个融合研究项目（表 1），以应对“未来 NSF 十大投入计划”中的 5 个科学研究前沿计划的科学挑战[9]，其分别是：① 未来人机融合的技术前沿；② 利用数据革命；③ 探索新北极；④ 量子跃迁；⑤ 理解生命的规则。第一批融合项目主要用于支持 RCNs 暑期学院和研讨会。

其中，第一批融合项目新资助的 RCNs 包括：① 在

使用智能机器（intelligent machines）的工作环境中，联合解决人-机前沿中人、机两个方面的挑战。RCNs 聚集一个多学科背景团队，集中解决提高工作场所的技术效益问题。② 将自然、物理、社会和信息方面的科学家与本土学者和社区团体聚集在一起，增进理解北极土著社区如何适应社会生态的飞速变化以及粮食安全方面的挑战。③ 使职业早期和中期的科学家把研究核心放在探索生命起源这个生物学中最深刻和持久的问题中来。

第一批融合资助的暑期学校项目包括对一所量子科学暑期学校的支持，该学校将汇集材料学、物理学、工程学、数学、计算机科学、化学和社会科学的学生，以期为量子科学领域储备跨学科领域的后备人才。

需要说明的是，第一批融合资助项目，除了 GCR 资助的项目，还有 NSF 其他计划资助的项目，如数据科学原理的跨学科研究计划（TRIODS）资助了“利用数据革命”方向[9]。

5 结论与建议

5.1 关于NSF支持融合研究的经验总结

NSF 把发展融合研究作为一项长远战略，并采取有力措施，给予大力支持。从中有 4 点经验值得借鉴：① 支持融合研究要有明确的战略指导思想、目标、长远规划，并给予持续的支持。② 对于融合研究的特点和发展条件需要充分认识，这是融合研究成功的前提。③ 支持融合研究，可以采取多种适合的形式。促进研究人员互动并建立交流协作网络十分重要。④ 注重跨学科后备人才的储备培养，使支持融合研究与下一代研究人员的培养和教育相结合。

表1　2017年NSF融合研究项目[9]

投入计划	融合研究项目
未来人机融合的技术前沿	● 协作：关于人机交互过程中多模态人类学习数据的融合研究研讨会（北卡罗来纳州立大学、范德堡大学） ● 自动驾驶对未来劳动力的影响：关于社会技术研究挑战、收益和机遇的研讨会 ● 形成人类技术伙伴关系研究，加强STEM（科学、技术、工程、数学）工作者的参与的工作坊 ● 从制造到微制造：重塑工作，超越大规模生产 ● 在众包研究中融合人与技术的观点研讨会 ● 让“工作的未来”工作——一个关于技术工人文化、合作、合作社、企业家精神和数字劳动力的实验工作坊 ● 融合对社会技术和日益自动化时代的工作环境的研究协调网络 ● RCN：通过基于系统的研究网络，提高中小型农场的生存能力——将技术与可持续发展和实践联系起来
利用数据革命	● TRIPODS：为大数据模型驱动的发现打下基础 ● TRIPODS：改进决策的数据科学：在不确定性、因果关系、隐私和网络结构的背景下学习 ● TRIPODS：建立数据科学基础研究所 ● 面向 21 世纪数据科学教育的社会科学洞察（SSI）
探索新北极	● 导航新北极——了解北极地区未来的交通系统的研讨会 ● 新北极的适应能力和恢复力：通过融合，为人类和自然找到公平、理想的结果 ● 为西北航道做准备：一个关于新英格兰在探索新北极中作用的研讨会 ● 建立北极土著社区和美国西南地区社区在数据科学知识共同生产的网络 ● 协调一个跨学科研究网络，以确定北极永久冻土海岸侵蚀及其社会生态影响的挑战和解决方案 ● ANCHOR——北极沿海社区危害、观测和综合研究网络
量子跃迁	● 合作：NSF/DOE量子科学暑期学校——麻省理工学院、约翰·霍普金斯大学、康奈尔大学、宾夕法尼亚州立大学 ● 研讨会系列：量子跃迁的跨部门连接 ● 量子元件安全通讯工作坊
理解生命的规则	● RCN：影响生物多样性的跨尺度过程 ● RCN：探索的生命起源

5.2 关于我国发展融合研究的现状、问题及若干政策建议

改革开放以来，我国对学科交叉融合研究的支持开始于国家自然科学基金委员会（以下简称“基金委”）的成立。1986年成立伊始，基金委就设立了重大项目，以支持学科交叉研究。自20世纪90年代中期起，随着国家重点基础研究发展计划（“973”计划）、中国科学院知识创新试点工程的实施，我国加大了对学科交叉融合研究的支持。2001年，基金委实施重大研究计划，其目标之一就是支持学科交叉融合的发展。2006年实施的《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》强调促进学科交叉的发展，并设立了4个重大研究计划——蛋白质研究、量子调控研究、纳米研究、发育与生殖研究，这4个计划不同程度地涉及学科交叉融合研究。近些年来，随着新兴技术的发展和国际科技交流的深入，一些有条件的大学和研究机构开始建立学科交叉融合机构，如北京大学生物医学前沿创新中心、中国科学院深圳先进技术研究院合成生物学研究所，这些机构在促进学科交叉融合研究发展方面取得了重要进展。

但是，我国的学科交叉融合研究还存在5个方面的问题：① *在战略层面*，学科交叉融合在国家科学技术发展中的战略地位有待于进一步加强。② *在研究计划和资助层面*，对学科交叉融合支持力度不够，学科交叉融合的效果还有待于提高。虽然基金委设有重大研究计划等支持学科交叉研究的计划项目，但现有的重大研究计划项目有相当一部分的交叉融合仍处于较低层次的学科汇集，尚达不到融合研究所要求的学科、思路和理论等方面的有机集成。而且，缺乏专门支持研究人员和研究组织进行跨学科、跨机构交流和网络建设的计划项目，而该类型的支持是国际上支持学科交叉融合研究所普遍采用的。因为，促进交叉融合研究项目需要打破学科的语言壁垒、增强彼此了解和联结后才能形成。③ *在学科交叉融合机构建设方面*，只有为数不多的融合研究机构取得了突出的成绩。一些机构更多是冠有其名，发展仍处于起步阶段。这是因为融合研究对基础设施和学科水平等方面具有较高的要求，需要专门的资源支持，在学科设置和评价制度、研究空间以及交叉融合文化方面需要保障。④ *在人才培养方面*，现有的研究生培养制度不利于学科交叉融合人才的培养。⑤ *在科学政策与管理方面*，对学科交叉以及融合研究发展的规律、特点和支持机制的认识还有许多不清楚的地方，需要加强。

要大力发展融合研究，需要在战略规划、研究计划、研究机构设置和人才培养等方面全面加强，为此，建议：① 在新的中长期科学和技术规划（2020—2035年）中，研究设立专门的融合研究计划。② 在国家自然科学基金重大研究计划的项目立项和实施中，加强融合研究；增设专门的计划，支持不同研究组跨学科、跨地域、跨机构交流和形成网络。③ 鼓励和支持各研究院所、大学制定有利于融合研究发展的政策和制度，培育融合研究文化，建立和发展融合研究机构。④ 通过专门的研究计划项目和研究生培养制度创新，加强对青年科研人员和研究生的学科交叉融合的培训和教育，培养下一代学科交叉融合研究人员。⑤ 加强对融合研究发展规律的研究，为相关政策的制定和实施提供科学基础。

参考文献

1 Roco M C, Bainbridge W S. Converging technologies for improving human performance: Integrating from the nanoscale. Journal of Nanoparticle Research, 2002, 4: 281-295.

2 Sharp P, Cooney C, Kastner M, et al. The Third Revolution: The Convergence of the Life Sciences, Physical Sciences and Engineering (White Paper). Washington DC: MIT Office, 2011.

3 NRC. Convergence: Facilitating Transdisciplinary Integration of Life Sciences, Physical Sciences, Engineering, and Beyond.

Washington D C: The National Academies Press, 2014.
4 美国科学院研究理事会. 会聚观: 推动跨学科融合. 王小理, 译. 北京: 科学出版社, 2015.
5 National Science Foundation. Convergence Research at NSF. [2019-12-20]. https://www.nsf.gov/od/oia/convergence/index.jsp.
6 National Science Foundation. 10 Big Ideas for Future NSF Investments. [2019-12-20]. https://www.nsf.gov/about/congress/reports/nsf_big_ideas.pdf.
7 National Science Foundation. Growing Convergence Research. [2019-12-20]. https://www.nsf.gov/news/special_reports/big_ideas/convergent.jsp.
8 National Science Foundation. Building the Future: Investing in Discovery and Innovation - NSF Strategic Plan for Fiscal Years (FY) 2018–2022. [2019-12-20]. https://www.nsf.gov/pubs/2018/nsf18045/nsf18045.pdf.
9 National Science Foundation. NSF issues first Convergence awards, addressing societal challenges through scientific collaboration. [2017-08-24]. https://www.nsf.gov/news/news_summ.jsp?cntn_id=242889.
10 National Science Foundation. Convergence Exemplars. [2019-12-20]. https://www.nsf.gov/od/oia/convergence/exemplars.jsp.
11 National Science Foundation. NSF FY 2020 Budget Reques to Congress. [2019-12-20]. https://www.nsf.gov/about/budget/fy2020/pdf/fy2020budget.pdf.
12 National Science Foundation. Research Coordination Networks (RCN). [2019-12-20]. https://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=11691.
13 National Science Foundation. Characteristics of Convergence Projects. [2019-12-20]. https://www.nsf.gov/od/oia/convergence/characteristics.jsp.
14 National Science Foundation. Dear Colleague Letter: Growing Convergence Research. [2019-12-20]. https://www.nsf.gov/pubs/2018/nsf18058/nsf18058.jsp.

US National Science Foundation's Funding for Convergence Research and Its Inspiration

FAN Chunliang* LI Dongyang FAN Tian
(1 Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2 School of Public Policy and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Convergence research is a new paradigm to promote science and technology, which will not only promote scientific breakthroughs, but also address the great challenges that human facing in the 21st century. This study investigates the meaning and characteristics of convergence research and the concept of National Science Foundation (NSF) convergence research. According to the 10 Big Ideas and the new Strategic Plan (2018–2022) of NSF, this paper points out the strategic position of development of convergence research in NSF, analyzes the foundation and characteristics of convergence research projects supported by NSF, and presents the implementation of the first convergence awards. The paper also summarizes some conclusions of NSF's support for convergence research, and puts forwards suggestions for China's development of convergence research.

Keywords convergence research, scientific paradigm, National Science Foundation (NSF), policy suggestions

* Corresponding author



樊春良 中国科学院科技战略咨询研究院研究员，中国科学院大学公共政策与管理学院岗位教授，博士生导师。中国科学学与科技政策研究会常务理事，科技政策专业委员会主任。长期从事科技政策与管理方面的研究，主要研究方向有：科技政策、科技与社会、国际科技合作。国家中长期科技发展战略研究专家。发表论文50余篇，出版《全球化时代的科技政策》一书（2005年）。E-mail: fcl@mail.casipm.ac.cn

FAN Chunliang Professor of Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences (CAS). He received his Doctor's Degree from Peking University. His main research area is Science Policy and he has published more than 40 papers in academic journals. He has also carried out some consulting research projects for Minister of Science and Technology of China, National Natural Science Foundation of China, and CAS. He was visiting scholar at Stanford University (2000.12–2001.12), and visiting scholar at Georgia Institute of Technology (2011.8–2012.2). E-mail: fcl@mail.casipm.ac.cn

■责任编辑：张帆

参考文献（双语版）

1 Roco M C, Bainbridge W S. Converging technologies for improving human performance: Integrating from the nanoscale. Journal of Nanoparticle Research: an Interdisciplinary Forum for Nanoscale Science and Technology, 2002, 4(4): 281-295.

2 Sharp P, Cooney C, Kastner M, et al. The Third Revolution: The Convergence of the Life Sciences, Physical Sciences and Engineering (White Paper). Washington DC: MIT Office, 2011.

3 NRC. Convergence: Facilitating Transdisciplinary Integration of Life Sciences, Physical Sciences, Engineering, and Beyond. Washington D C: The National Academies Press, 2014.

4 美国科学院研究理事会. 会聚观：推动跨学科融合——生命科学与物质科学和工程学等学科得跨界. 王小理, 熊燕, 于建荣, 译. 北京: 科学出版社, 2015.

United States National Research Council. Convergence: Facilitating Transdisciplinary Integration of Life Sciences, Physical Sciences, Engineering, and Beyond. Translated by Wang X L, Xiong Y, Yu J R. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese)

5 National Science Foundation. Convergence Research at NSF. [2019-12-20]. https://www.nsf.gov/od/oia/convergence/index.jsp.

6 National Science Foundation. 10 Big Ideas for Future NSF Investments. [2019-12-20]. https://www.nsf.gov/about/congress/reports/nsf_big_ideas.pdf.

7 National Science Foundation. Growing Convergence Research. [2019-12-20]. https://www.nsf.gov/news/special_reports/big_ideas/convergent.jsp.

8 National Science Foundation. Building the Future: Investing in Discovery and Innovation - NSF Strategic Plan for Fiscal Years (FY) 2018–2022. [2019-12-20]. https://www.nsf.gov/pubs/2018/nsf18045/nsf18045.pdf.

9 National Science Foundation. NSF issues first Convergence awards, addressing societal challenges through scientific collaboration. [2017-08-24]. https://www.nsf.gov/news/news_summ.jsp?cntn_id=242889.

10 National Science Foundation. Convergence Exemplars. [2019-12-20]. https://www.nsf.gov/od/oia/convergence/exemplars.jsp.

11 National Science Foundation. NSF FY 2020 Budget Reques to Congress. [2019-12-20]. https://www.nsf.gov/about/budget/fy2020/pdf/fy2020budget.pdf.

12 National Science Foundation. Research Coordination Networks (RCN). [2019-12-20]. https://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=11691.

13 National Science Foundation. Characteristics of Convergence Projects. [2019-12-20]. https://www.nsf.gov/od/oia/convergence/characteristics.jsp.

14 National Science Foundation. Dear Colleague Letter: Growing Convergence Research. [2019-12-20]. https://www.nsf.gov/pubs/2018/nsf18058/nsf18058.jsp.